

Eje temático- Gestión Integral del Recurso Hídrico

**Simulación matemática de la calidad del agua en la zona media del río
“Chocho” en el sector de Fusagasugá, a partir del modelo de Streeter y
Phelps**

Néstor David Ariza Gaitán 064081052.

Jorge Leonardo Rondón López 064092027.

Proyecto de Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director: Ing. Rafael Nikolay Agudelo Valencia

Asesor: Ing. Ingrid Alexandra Rivera

Universidad Libre

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C.

Febrero de 2018

Resumen

El río “Chocho” es el cuerpo de agua receptor de los vertimientos del municipio de Fusagasugá y algunas de sus veredas, así como también de las aguas servidas de Chinauta y Silvania. En el presente proyecto se realizaron caracterizaciones al agua del río con el objeto de aplicar el modelo matemático propuesto por Streeter y Phelps, y así evaluar el efecto que tiene la materia orgánica sobre el oxígeno disuelto del río.

Se realizaron 3 campañas de aforo y muestreo en 6 puntos diferentes, correspondientes a un recorrido de 14 km, la primera estación de muestreo fue ubicada aguas arriba del primer vertimiento realizado por el municipio de Fusagasugá y el último punto de muestreo ubicado después del vertimiento realizado por el municipio de Chinauta. Los muestreos fueron realizados en tres distintas temporadas, buscando abarcar la variación estacional de las precipitaciones en la zona.

El menor resultado de oxígeno disuelto en el río se presentó para el muestreo realizado en el mes de Diciembre de 2015, el cual correspondió a una fuerte temporada de sequía en la zona, motivo por el cual la capacidad asimilativa por dilución que posee el río Chocho fue menor. Los resultados de la simulación del modelo aplicado al río Chocho, indican que la carga orgánica contaminante recibida por esta corriente no afecta significativamente la concentración del oxígeno disuelto del agua, incluso para la temporada de menor caudal del río, las condiciones topográficas de la zona hacen que la capacidad de reaireación atmosférica sea suficiente para asimilar la carga orgánica recibida.

Abstract

The "Chocho" river is the body of water that receives the water from the municipality of Fusagasugá and some of its rural areas, as well as the sewage from Chinauta and Silvania. With the objective to apply the mathematical model of Streeter y Phelps, in this project were made characterizations to the river water and thus evaluate the effect that the organic matter has on the dissolved oxygen of the river.

There were 3 monitoring and sampling campaigns in 6 different points, corresponding to a 14 km route, the first sampling station was located upstream of the first dump made by the municipality of Fusagasugá and the last sampling point located after the dump of the municipality of Chinauta. The demonstrations were conducted in three different seasons, searching to cover the seasonal variations of precipitation in the area.

The lowest dissolved oxygen content in the river was presented for the sampling performed in December 2015, which corresponded to a strong season of drought in the area, reason why the assimilative capacity by dilution that owns the river Chocho Was smaller. The results of the simulation of the model applied to the Chocho River indicate that the pollutant organic load received by this stream does not significantly affect the dissolved oxygen concentration of the water, even for the season of lower river flow, the topographic conditions of the zone makes that the atmospheric re-airing capacity is sufficient to assimilate the organic load received.

Tabla de contenido

Resumen	2
1. Introducción	5
2. Descripción del Problema.	8
3. Justificación.	10
4. Antecedentes.....	12
5. Objetivos.	15
5.1 Objetivo General.....	15
5.2 Objetivos Específicos.....	15
6. Marco referencial	16
6.1 Marco teórico.....	16
6.1.1 Ecuaciones para la modelación.	19
6.3 Marco geográfico	24
6.4 Marco metodológico	27
6.4.1 Actividades realizadas a lo largo del proyecto.....	27
7. Resultados y análisis.....	31
7.1 Resultados de las campañas de aforo y muestreo	31
7.1 Resultados de las simulaciones.....	34
7.2 Máxima concentración de DBO en el cuerpo de agua receptor	41
7.3 Resultados de los análisis de nitrógeno y fósforo.	44
7.4 Indicadores de calidad del agua.....	48
8. Conclusiones	51
Anexo 1	56
Anexo 2.....	61

1. Introducción

La modelación de calidad del agua superficial, consiste en la representación matemática de los diferentes fenómenos que intervienen sobre una sustancia o contaminante que se encuentra presente o es vertido a un cuerpo de agua y que es transportado por este mismo. El objeto de la simulación es lograr obtener una representación del comportamiento de la sustancia o contaminante durante su recorrido a lo largo del río, en otras palabras, la idea es establecer la línea de tendencia de la concentración del contaminante durante el paso por el trazado del río, con lo cual se puede contribuir a determinar el grado de afectación sobre la calidad del agua y simultáneamente establecer si existen conflictos de uso con relación a los usos actuales que recibe el agua de la fuente analizada, de esa manera se puede realizar la ordenación del recurso conforme a lo establecido en el Decreto 3930 de 2010. Por otra parte, la simulación de calidad del agua, puede ser empleada para realizar la planeación de las obras de saneamiento básico requeridas a fin de no alterar las características del ecosistema acuático y tampoco afectar los usos del recurso hídrico.

Existen una amplia variedad de modelos para la simulación de calidad del agua superficial, la mayoría de ellos tiene como modelo base, el modelo de disminución de oxígeno disuelto propuesto por Streeter y Phelps (1925), el cual considera el efecto de la DBO (como una medida indirecta de la carga orgánica transportada por el receptor del vertimiento) sobre la concentración de oxígeno disuelto (se considera al oxígeno disuelto en el agua de un río como el parámetro fundamental, que indica la calidad ecológica de un río). El modelo de Streeter y Phelps es un modelo unidimensional, en estado estacionario con cinéticas de degradación de orden uno, es decir, se considera el transporte y degradación del contaminante solamente en el eje x, dicho de otra manera, transporte longitudinal. Por otro lado,

se asume que los caudales, concentraciones y velocidad del agua del río no varían con el tiempo.

Por otra parte el modelo base para los modelos más complejos de simulación es la ecuación de dispersión turbulenta, es decir, se analiza el flujo advectivo y dispersivo de los contaminantes en las tres posibles direcciones de flujo, la cinética de degradación puede ser de primer orden o el orden que fuese de acuerdo al contaminante y se considera la variable tiempo dentro de la simulación. Este tipo de modelo se plantea principalmente para cuerpos de agua en los cuales la suposición de mezcla completa no es aceptable, es decir, para cuerpos de agua anchos y profundos, en los cuales existen gradientes de concentración en dichas direcciones, situación que no necesariamente es la que se presenta en el tramo analizado del río Chocho, en el cual a causa de una pendiente promedio del (4.5%) y poca profundidad (0.62 m), se puede asumir la mezcla completa de las aguas en su cauce a lo largo del tramo objeto de estudio.

La legislación ambiental colombiana, desde el año 1984, en el Decreto 1594 establece la importancia de realizar la ordenación de las fuentes de agua superficial. Para lograr esta ordenación se plantea el uso de los modelos de simulación de calidad del agua como insumo fundamental para lograr establecer los usos del agua de las distintas fuentes hídricas existentes en la nación. El Decreto 1594 de 1984 fue derogado en el año 2010 por el Decreto 3930, en el cual igualmente se plantea la ordenación de los cuerpos de agua y el uso de modelos de simulación para tal fin. Con base en lo anterior, se espera que el presente trabajo sea un primera aproximación a una simulación más completa que permita realizar una ordenación más precisa de la calidad del agua del río Chocho y de la capacidad asimilativa de esta corriente superficial, a fin de establecer las máximas cargas contaminantes soportadas y a partir de éstas, controlar los vertimientos que se puedan realizar

Antes de iniciar el trabajo, se realizó un recorrido a lo largo del tramo analizado con el objeto de determinar la ubicación de puntos de vertimiento, y puntos o estaciones de muestreo, así mismo, el recorrido fue importante para conocer las condiciones del cauce, se observó que a lo largo de la mayoría del tramo el lecho del río presenta una considerable cantidad de piedras y rocas de gran tamaño que favorecen la perturbación de la superficie del agua y por lo tanto la reaeración atmosférica, también se observó que no se presentan tramos lenticos, el recorrido del río es lótico en su gran mayoría. Por otra parte la mayoría de las piedras presentes en el agua presentan algas, dando lugar a considerar la presencia de nutrientes en el agua, hecho se puede atribuir a los vertimientos de aguas residuales.

La simulación de la calidad del agua permitió analizar que en cuanto al oxígeno disuelto en el agua del río, disminuye en la cercanías al punto de mezcla, pero después y una vez disminuye la concentración de DBO, la concentración de oxígeno se incrementa de manera gradual, logrando alcanzar valores aceptables para la soportar la calidad del ecosistema acuático. Adicional a la simulación y conforme a los resultados de calidad del agua obtenidos en laboratorio, se realizó el cálculo del índice de calidad del agua (ICA), este cálculo fue hecho entre cada uno de los puntos de muestreo y permitió determinar que el río Chocho presenta calidad entre aceptable y regular a lo largo del tramo analizado en este proyecto.

Finalmente, los resultados de la simulación de los parámetros de calidad del agua analizados en este trabajo, fueron comparados con los parámetros de ordenación establecidos en el Decreto 3930 de 2010, obteniéndose que el agua del río Chocho puede ser empleada para la mayoría de usos establecidos en la norma.

2. Descripción del Problema.

El río Chocho a la altura del municipio de Fusagasugá representa para los habitantes de la zona, la base o soporte para su desarrollo económico y social, hecho que se debe a la explotación y uso de los servicios ambientales que puede prestar el recurso. Las principales actividades productivas del municipio de Fusagasugá son la agricultura y la ganadería, cabe resaltar que el municipio recibe continuamente visitantes, lo cual le confiere otra actividad productiva para la economía local, es decir, el turismo.

Dentro de las distintas actividades del sector agrícola se emplean productos para el control de plagas y de insectos, se realiza la plantación de especies no nativas en la zona y la deforestación (Holvoeta, Seuntjensb, & Vanrolleghema, 2007). Además muchas de las actividades pecuarias se realizan de manera poco amigable con el ambiente, por ejemplo la presencia de excretas de ganado vacuno las cuales pueden llegar al río por escorrentía, afectando la calidad del agua del río (Ministerio de Agricultura, 1984). Los impactos asociados a las actividades anteriormente mencionadas sobre el recurso hídrico son, los deslaves, la disminución de la cantidad y la calidad del agua, la pérdida de biodiversidad, graves desequilibrios ecológicos y la presencia de coliformes fecales en el agua. (Londoño Pérez & Parra Martínez, 2007).

Las continuas descargas de aguas residuales domésticas, mineras, canteras, industrias manufactureras y pecuarias son el principal factor de afectación para la calidad del agua del río Chocho. Con el fin de lograr un óptimo uso del recurso se deben tener en cuenta las funciones que cumple el cuerpo de agua; entre las cuales se encuentran la función de abastecimiento de agua potable y receptor de los vertimientos del alcantarillado (Conesa Fernández, 2009). Esto implica

garantizar la calidad del recurso para los diferentes usuarios (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

El problema que se desea resolver, es realizar una primera aproximación para la implementación de una herramienta clara y sencilla que permita realizar una simulación matemática de la calidad del agua en el río Chocho, en el sector de Fusagasugá. El modelo que se desea aplicar para la simulación corresponde al Modelo de disminución de oxígeno disuelto, propuesto por Streeter & Phelps, (Thomann & Mueller, 1987), para lo cual se hace uso de la carga orgánica recibida por el río en términos de DBO y por medio de la cual se podrá analizar el comportamiento del oxígeno disuelto en el agua del río, a fin de establecer la máxima carga contaminante soportada por el río y a la vez determinar los límites de vertimiento de materia orgánica a este cuerpo de agua.

De acuerdo a esta problemática expuesta surge el siguiente planteamiento:
¿Representa el modelo de Streeter & Phelps el comportamiento del oxígeno en el río Chocho?

3. Justificación.

Este proyecto es relevante dado que se realizará en la zona media del río “Chocho” en el sector de Fusagasugá, con el fin de realizar una primera aproximación que permita conocer la dinámica de DBO y oxígeno disuelto en el cuerpo de agua receptor. De esta manera se pueden planear alternativas para preservar el recurso hídrico de la región.

El río Chocho es una de las fuentes hídricas del municipio de Fusagasugá, entre otros usos que recibe el agua de esta corriente superficial está el ser receptor de las aguas residuales domésticas de Fusagasugá, Chinita. Por otra parte, es válido resaltar que los cauces de las subcuencas del Río Subía y la Cuenca del Barro Blanco y Chocho ubicados en los municipios de Sibate, Granada y Fusagasugá, presentan contaminación en sus aguas a causa de los vertimientos de los distintos sectores del área de influencia. (EMSERFUSA E.S.P).

Es importante tratar esta problemática mediante una evaluación que permita determinar la capacidad de autodepuración o de asimilación de materia orgánica que el cuerpo de agua presenta. El conocimiento de los distintos elementos que dan lugar a la alteración de la estabilidad del sistema hídrico en cuanto a su calidad, permite planear de manera eficaz las acciones de saneamiento básico necesarias para preservar la calidad del agua del río. En otras palabras el objetivo es lograr cuantificar el efecto negativo que ocasiona la materia orgánica sobre la calidad del recurso en términos de oxígeno disuelto, con el objeto de preservar la calidad ecológica del río y no afectar los servicios ambientales que este puede ofrecer a la comunidad.

Para realizar la evaluación de la calidad de agua en la cuenca media del río Chocho, se tendrán en cuenta parámetros tales como, oxígeno disuelto, pH,

temperatura, conductividad, sólidos suspendidos totales, DBO_5 , nitrógeno orgánico, fósforo, cada uno de estos análisis aportará información valiosa para dar un diagnóstico del estado del agua en la zona media del río Chocho. (IDEAM, 2011) Los parámetros analizados serán la base para realizar la simulación de calidad del agua del río Chocho.

La modelación matemática de calidad del agua y su respectiva simulación representan una herramienta de proyección de escenarios de contaminación con el beneficio de permitir planear de manera eficiente las obras de saneamiento básico que conduzcan a lograr preservar la calidad del agua de las corrientes receptoras de vertimientos, en este caso específico, se realizó la modelación a partir de las ecuaciones propuestas por Streeter & Phelps en 1925 y se hace la simulación con base en la solución analítica de las ecuaciones del modelo. (Domínguez, 2005)

4. Antecedentes

La simulación de calidad del agua superficial ha sido tema de múltiples investigaciones a nivel mundial, en ellas el principal objetivo ha sido determinar el efecto de los contaminantes descargados por comunidades a las fuentes de agua superficial, incluidos ríos, quebradas, lagos y océanos. En esta sección, se presenta una pequeña reseña de algunos de ellos.

En México, en el estado de Hidalgo se adelantó una investigación que duró dos años y en la cual se simula la calidad del agua para un tramo de 50 km del río Tula. El río Tula es receptor de parte de los vertimientos de la ciudad de México. Los resultados de las simulaciones demuestra el deterioro de la calidad del agua debido a bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua, afectando la calidad ecológica de la fuente, así como también altas concentraciones de coliformes y algunos metales, lo que a su vez conlleva daños irreversibles reflejados en la pérdida de calidad de vida, la afectación de los usos del agua y a otros bienes y servicios prestados por esta fuente hídrica. (Rosalba Casanova, 2007)

Existen modelos de simulación para una amplia variedad de parámetros de calidad del agua.

En Colombia, puntualmente en la ciudad de Bogotá, se han realizado estudios de simulación de la calidad del agua, con fines propios para tener claridad de las alternativas que se pueden planear y ejecutar en un proceso de saneamiento ambiental para la ciudad. Los estudios realizados por los investigadores en el río Bogotá revelan que el río no tiene la facultad de auto – depuración a lo largo del tramo de la cuenca media, y que el consumo total del oxígeno disuelto en éste ocasiona que dicha recuperación no sea posible. Gracias a la simulación y a los

resultados de los parámetros obtenidos se pueden plantear alternativas novedosas de saneamiento y se pueden establecer nuevos puntos de monitoreo según lo requiera el estudio. (Díaz, 2004).

Estudios realizados en Cuba al río Luyano desde su nacimiento hasta su desembocadura en la bahía de La Habana, determinan el grado de contaminación que este transporta a lo largo de su recorrido. La modelación matemática (Streeter y Phelps) realizada a éste cuerpo de agua les permitió diseñar las estrategias para recuperar ecosistemas afectados, obteniendo datos de auto – depuración y el balance de oxígeno en las aguas estudiadas (Valcárcel, 2010).

Como se puede apreciar, a nivel mundial la simulación de calidad del agua ha sido objeto de estudio para la evaluación del comportamiento de los cuerpos de agua afectados por alguna condición que las impacta, en especial para ríos que corren a lo largo de la zona urbana de municipios y ciudades.

Dentro del POMCA del río Sumapaz realizado en el año 2016, se realizó un diagnóstico de la Subcuenca del Río Panches y a su vez de sus afluentes como los Ríos Subia, Chocho, Barro blanco, entre otros. Se referencian procesos erosivos de alta magnitud, con cantidades entre las 50 y 200 ton/ha/año las cuales afectan la margen derecha del río Chocho, esto se convierte en un aporte de sedimentos significativo en el cuerpo de agua a la altura de Tibacuy.

Dentro del estudio se observa que evaluaron los resultados teniendo en cuenta el Decreto 1594/84, el cual establece criterios de calidad para la destinación del recurso. Los resultados de Oxígeno disuelto y DBO5 se presentan con 9,0 mg/L y 2,7 mg/L respectivamente, lo cual indica que las características del río en términos de calidad son óptimas. También se puede mencionar que hay presentes bajos procesos de degradación de materia orgánica y sustancias oxidantes, así como

que el buen nivel de Oxígeno disuelto permite la sobrevivencia de especies acuáticas. Esto se confirma en el porcentaje de saturación de Oxígeno, el cual es de 100% a una altitud de 823 m y una temperatura de 26°C. El uso principal que se reporta en estos términos es el de, adecuación de aguas y recuperación ecológica con fines de manejo integral para garantizar servicios sociales y ambientales, a través de implementación de PTAR, PMAA Y PGIRS.

Se tuvo en cuenta la aplicación de los índices de contaminación, donde se evidencia que el Río Chocho se encuentra en un grado de contaminación alta según el índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) obtenido. Una de las posibles razones, es la disposición de aguas residuales domésticas que se ha realizado por años en la zona, además sin ningún tipo de remoción de cargas contaminantes. (CAR, (n.d))

5. Objetivos.

5.1 Objetivo General

Simular matemáticamente la calidad del agua en la zona media del río “Chocho” en el sector de Fusagasugá, a partir del modelo de Streeter y Phelps.

5.2 Objetivos Específicos

Determinar la concentración máxima de DBO soportada por el río Chocho en el sector de Fusagasugá.

Evaluar el comportamiento del oxígeno disuelto en el agua del río a lo largo del tramo de estudio.

6. Marco referencial

6.1 Marco teórico

Los modelos de calidad de aguas tienen por finalidad determinar las nuevas concentraciones de contaminantes del cuerpo de agua en cada punto y a lo largo del tramo de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidas. De acuerdo a lo anterior, se puede establecer que un modelo de calidad de aguas es la herramienta adecuada para la predicción del comportamiento de la calidad del agua en un río u otro cuerpo de agua. Por lo tanto, corresponderá a un set de expresiones matemáticas que definen los procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en un cuerpo de agua. Las ecuaciones están basadas fundamentalmente en la conservación de la masa y/o energía. (Cea, s.f)

Los procesos fundamentales que rigen la calidad del agua de una corriente, ya sea fluvial o lacustre, son los procesos hidrológicos, térmicos y bioquímicos. Los procesos hidrológicos deben entenderse, como aquellos exclusivamente relativos a la hidrología del cuerpo de agua, como aquellos referidos al comportamiento hidrodinámico. El objetivo primario del desarrollo de cualquier modelo de calidad de agua, es plantear un conjunto de expresiones matemáticas para representar un fenómeno, es producir una herramienta que tenga la capacidad de simular el comportamiento de las componentes hidrológicas y de calidad de un cuerpo de agua. El desarrollo de esta herramienta para simular el comportamiento del prototipo, se hace aplicando un modelo matemático, el cual se realiza a partir de una representación conceptual, representación funcional y la representación computacional, es decir, resolver las ecuaciones para poder obtener una representación del comportamiento de lo que se está estudiando. (Leoz, 2011)

El desarrollo de un modelo de calidad del agua, debe seguir las etapas que se muestran en la figura 1. La representación conceptual comprende una idealización gráfica del prototipo, considera la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas y la identificación de las condiciones de frontera e interrelaciones entre las partes del prototipo. Normalmente, este proceso impone divisiones del prototipo en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos que el modelo debe representar, estos elementos se definen de acuerdo a algunas simples reglas geométricas, y se diseña el modo por el cual serán conectados, tanto física como funcionalmente, como parte integrante de un todo.

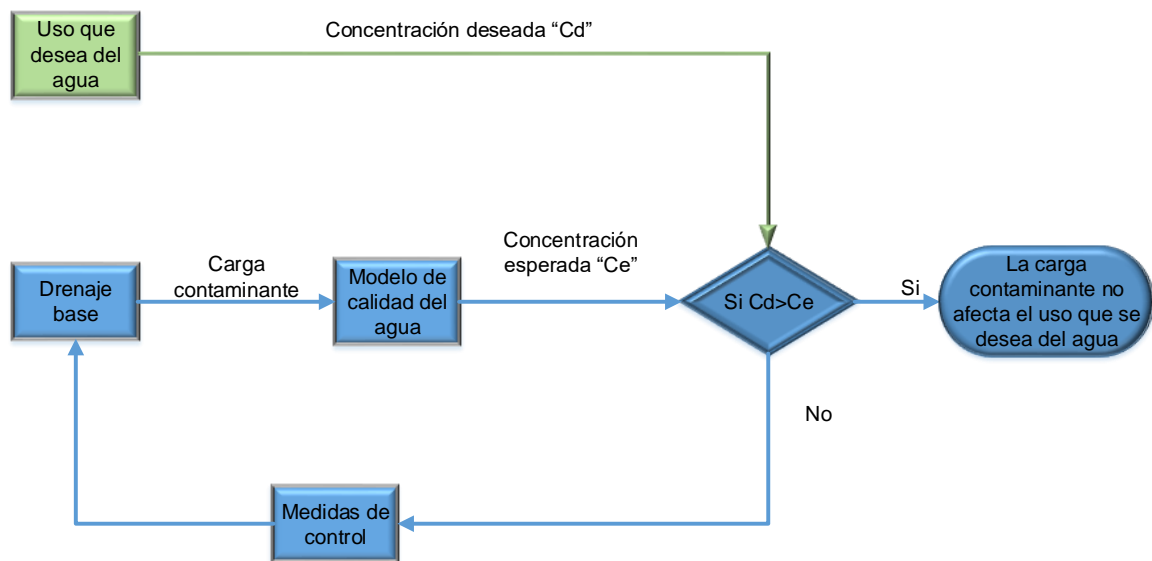


Figura 1. Representación conceptual de un modelo de calidad del agua.

Adaptado de (Thomann & Mueller, 1987)

Con el fin de realizar una mejor planificación de obras de saneamiento básico se emplea la simulación de calidad del agua. Este tipo de herramienta, facilita la determinación de la capacidad asimilativa o de autorecuperación de los cuerpos de agua superficial. La simulación permite determinar el comportamiento físico, químico y microbiológico del receptor de los vertimientos con el fin de predecir las

condiciones ante cambios en la descarga, caudal del río, clima, etc. Este hecho facilita la identificación de los puntos más críticos en cuanto a calidad y permite una óptica objetiva para tomar las acciones correctivas y evaluar su efecto, dando como resultado un ahorro en tiempo y esfuerzos económicos para el control de la contaminación de las fuentes hídricas. El establecimiento de los modelos de calidad del agua es una herramienta útil para definir planes de ordenamiento de los cuerpos de agua superficial. Dicha herramienta fue incluida en el Decreto 1594 de 1984, y en la actualidad hace parte o está incluida en el Decreto 3930 de 2010, el cual derogó el Decreto 1594. (Vera, 2009)

El primer modelo de calidad del agua que se empleó en la práctica, fue el modelo presentado por Streeter & Phelps en 1925. La figura 2, Contiene una representación conceptual del modelo propuesto por Streeter & Phelps, el cual es conocido como el modelo de disminución de oxígeno disuelto.

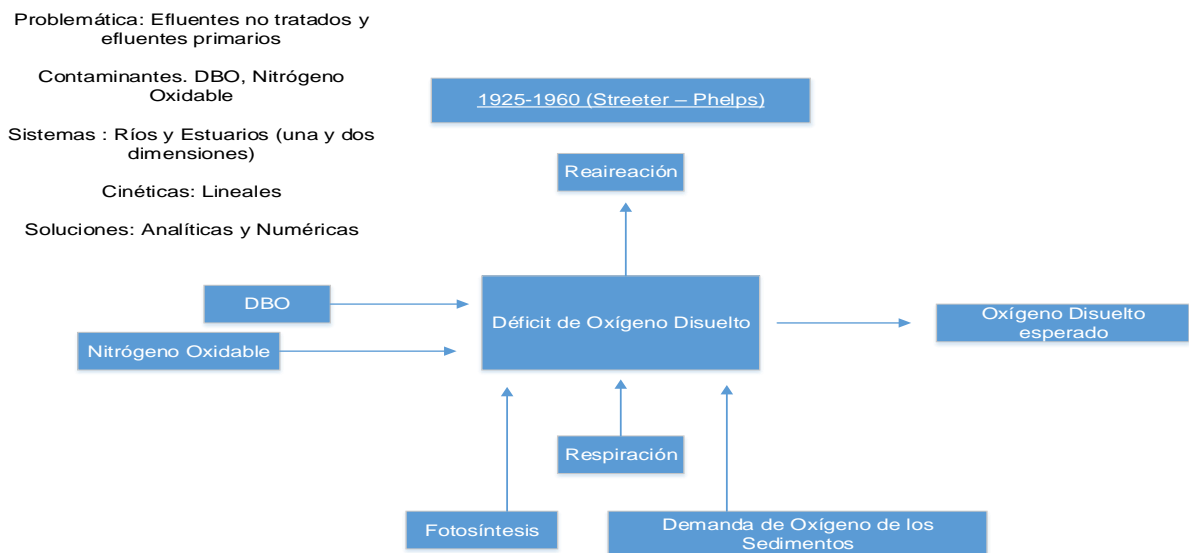


Figura 2. Representación conceptual del modelo de oxígeno disuelto en cuerpos de agua superficial

Adaptado de (Thomann & Mueller, 1987)

6.1.1 Ecuaciones para la modelación.

La simulación de calidad del agua se plantea a partir del modelo matemático de dispersión turbulenta de contaminantes, incluyendo el término de reacción. El modelo se plantea a partir del balance de materia para una sustancia en torno a un volumen de control. El modelo de dispersión turbulenta, plantea la simulación teniendo en cuenta el transporte advectivo, dispersivo y la reacción del contaminante en el medio, además, es un modelo en estado transitorio, es decir se tiene en cuenta las variaciones de las variables con respecto al tiempo. La ecuación del modelo mencionado, se presenta a continuación.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U_x * \frac{\partial c}{\partial x} + D_x * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U_y * \frac{\partial c}{\partial y} + D_y * \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - U_z * \frac{\partial c}{\partial z} + D_z * \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \pm K_i * c \quad (1)$$

En la ecuación anterior “t” es el tiempo, “c” es la concentración del contaminante, “x”, “y”, “z” son las direcciones de flujo del contaminante en el medio, “U_i” es la velocidad del contaminante en cada una de las direcciones de flujo, “D_i” es la difusión del contaminante en las diferentes direcciones de flujo y “K_i” es el coeficiente cinético de primer orden para la degradación o formación de la sustancia de interés. La ecuación (1) se puede simplificar teniendo en cuenta que debido a la pronunciada pendiente (mayor a 4.5%) de la zona de estudio, el agua se puede considerar completamente mezclada y se supondrá que las características del cuerpo de agua no varían con el tiempo, se asume que las cinéticas de transformación son de primer orden, de acuerdo a esto, se llega a la siguiente expresión.

$$U_x \frac{dc}{dx} = -K_i * c \quad (2)$$

En la ecuación anterior k_i corresponde al coeficiente cinético de transformación de la sustancia “i”

La solución de la ecuación anterior es.

$$c = c_o * e^{(-K_i * \frac{x}{U})} \quad (3)$$

Siendo c_o la concentración del contaminante en el punto de mezcla entre el vertimiento y el cuerpo de agua receptor, U la velocidad del agua en la dirección de flujo y x la distancia recorrida por el agua a partir del punto de mezcla. Esta ecuación se empleará para simular el comportamiento de DBO y oxígeno disuelto en el agua del río Chocho.

Teniendo en cuenta que la concentración de oxígeno en el agua, alcanza un valor máximo (oxígeno disuelto de saturación, el cual depende de la temperatura, presión atmosférica y salinidad), y que, además, el mecanismo de reaeración atmosférica es la principal fuente oxígeno en un cuerpo de agua superficial, y teniendo en cuenta que el mayor consumo de oxígeno disuelto en el agua se debe a la mineralización de la materia orgánica, se puede plantear el balance para esta situación, de manera que se obtiene la ecuación que aparece a continuación.

$$\frac{dO}{dx} = K_a * (O_s - O) - K_d * L \quad (4)$$

En esta ecuación, O_s la concentración de saturación de oxígeno en el agua y O la concentración de oxígeno en el punto analizado, L es la DBO del río en mg/L, K_a el coeficiente cinético de reaeración atmosférica en días⁻¹ y K_d el coeficiente cinético de desoxigenación en días⁻¹. La determinación de K_a también se plantea a partir de consideraciones teóricas.

Para la determinación de coeficiente de reaireación atmosférica, O'connors propone la siguiente ecuación.

$$K_a = \frac{kL}{H} = \frac{(D_L * U)^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

En la ecuación anterior, K_a es el coeficiente de reaireación de días⁻¹, D_L es la difusividad del Oxígeno a 20°C = 0.000081 ft²/h, U es la velocidad promedio del río en ft/s y H es la profundidad promedio del río en ft. Si se reemplaza el valor de D_L , la ecuación tendrá la siguiente forma.

$$K_a = (0.000081 \frac{ft^2}{h})^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\frac{ft}{s})^{\frac{1}{2}}}{ft^{\frac{3}{2}}} = 0,009 \frac{ft}{h^{0,5}} \cdot \frac{(1 h)^{0,5}}{(3600 s)^{0,5}} \cdot \frac{\frac{ft^{0,5}}{s^{0,5}}}{ft^{1,5}} = \frac{0,009 ft}{(3600 s)^{0,5}} \cdot \frac{ft^{0,5}}{s^{0,5}} \cdot ft^{1,5} =$$

$$\frac{0,009 ft}{(3600 s)^{0,5}} \cdot \frac{1}{s^{0,5}} \cdot \frac{86400 s}{1 día} = 12.9 * \frac{(U)^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

El valor 12.9 empleado en esta ecuación tiene unidades de ft/día y fue tomado para 20 °C, lo cual es una temperatura muy cercana a la del agua del río Chocho en el tramo analizado, la ecuación es aplicable para ríos con profundidades entre 0.3 m y 9 m, y para velocidades el agua entre 0.15 m/s y 0.45 m/s, rangos dentro de los cuales están dichas variables medidas para el río Chocho.

La solución de la ecuación diferencial para oxígeno disuelto (ecuación 4) es la que aparece a continuación.

$$O = O_s - \left\{ \frac{k_d}{k_a - k_d} * \left[\exp\left(-k_d * \frac{x}{U}\right) - \exp\left(k_a * \frac{x}{U}\right) \right] \right\} * L_0 - (O_s - O_0) * \exp\left(-k_a * \frac{x}{U}\right) \quad (7)$$

En la ecuación anterior, L_0 es la DBO del agua del río en el punto de mezcla en mg/L, O_s es la concentración de saturación del oxígeno disuelto en el agua, expresada en mg/L, O_0 es la concentración de oxígeno disuelto del agua en el punto de mezcla, K_d es el coeficiente cinético de desoxigenación, en días⁻¹, K_a es el coeficiente cinético de reaeración, en días⁻¹, x es la distancia recorrida por el agua después del punto de mezcla en m y U es la velocidad del agua en el río en m/día. A partir de la ecuación 7, se puede determinar la concentración del oxígeno disuelto a lo largo de una corriente superficial, aguas abajo de un punto de vertimiento. Se puede observar que existe una fuerte dependencia en la tendencia de la concentración de oxígeno disuelto con respecto a los valores de los coeficientes cinéticos de desoxigenación y reaeración, pero en especial existe una fuerte dependencia del valor de la DBO en el punto de mezcla entre el vertimiento y el cuerpo de agua. Con el fin de determinar la máxima carga orgánica que puede ser transportada por una corriente de agua, se puede emplear las ecuaciones diferenciales de balance, pero haciendo los ajustes para determinar los máximos y mínimos de la ecuación, haciendo algunas operaciones matemáticas sobre la ecuación diferencial de balance se llega a las ecuaciones que permitan hallar el tiempo crítico y la máxima DBO soportada por un cuerpo de agua:

$$t_c = \frac{1}{K_a - K_d} * Ln \left[1 - \left(\frac{(K_a - K_d) * D_o}{K_d * L_o} \right) \right] \quad (8)$$

En la ecuación anterior t_c es el tiempo crítico en el cual después de haber recibido el vertimiento, el oxígeno disuelto alcanza el mínimo valor, D_o es el déficit inicial de oxígeno disuelto. Una vez determinado el tiempo crítico se determina la máxima DBO que puede soportar el río ($L_{om\acute{a}x}$), para lo cual se define un valor de $OD_{Cr\acute{it}ico}$, de acuerdo al Decreto 3930 de 2010, dicha concentración generalmente toma como valor 4 mg/L de O_2 . Cabe resaltar que con base en las suposiciones realizadas para el modelo, se desprecia la tasa de pérdida de DBO particulada por sedimentación durante el recorrido.

$$L_{o_{Max}} = \frac{K_a - K_d}{K_d} * \left[\frac{(OD_{sat} - OD_{Cr\acute{it}ico}) - (D_o * e^{-K_a * t_c})}{e^{-K_d * t_c} - e^{-K_a * t_c}} \right] \quad (9)$$

En la ecuación anterior, OD_{sat} es la concentración de saturación de oxígeno disuelto en el agua (mg/L), $OD_{cr\acute{it}ico}$, es la mínima concentración de oxígeno disuelto en el agua (mg/L), de acuerdo al uso que se desea dar al recurso hídrico, D_o es el déficit inicial de Oxígeno disuelto (mg/L), es decir, la diferencia entre el oxígeno disuelto de saturación en el punto de mezcla y la concentración de oxígeno disuelto en el punto de mezcla. El valor de $L_{oM\acute{a}x}$ es el máximo valor de concentración DBO que puede alcanzar el agua del río de manera que el mínimo

valor de Oxígeno disuelto sea el valor crítico seleccionado, con este valor y con el valor de DBO medido en el agua del río, se puede determinar el índice de DBO. La fórmula para calcular el índice de DBO se presenta a continuación.

$$I_{DBO_5} = \frac{DBO_{5_{medida}}}{DBO_{5_{Maxima\ Permisible}}} \quad (10)$$

Si el valor del indicador es mayor de 1, el río transporta más DBO que la que puede soportar y por lo tanto el oxígeno disuelto en el agua del receptor presentará concentraciones de oxígeno disuelto por debajo del valor crítico, si el valor del índice de DBO es menor que 1, el agua del río transporta una carga menor que la que puede soportar, de manera que no se presentarán bajas concentraciones de oxígeno disuelto.

6.3 Marco geográfico

La cuenca del río Chocho se encuentra en el departamento de Cundinamarca. Este cuerpo de agua nace en el municipio de Silvania. La zona media del recorrido realizado por el río corresponde al trazado en jurisdicciones de los municipios de Pasca y Fusagasugá. La parte baja de su trazado se encuentra en los municipios de Tibacuy y Chinauta, desde donde el cauce toma el nombre de río Panches. El río Chocho es uno de los ríos del departamento de Cundinamarca, en el centro de Colombia. Es el principal eje fluvial de la subcuenca río Panches. No es navegable y este desemboca en el Río Sumapaz, que a su vez desemboca en el Río Magdalena. Con el nombre primero de río Chocho y luego de Panches

hasta la confluencia con el río Sumapaz entre los 1400 y 445 msnm, se presenta un aumento de la pendiente del lecho del cauce, en la mitad del tramo y luego descendiendo, oscilando entre 9.3% y 1.6%, formando un cañón de bajas pendientes rodeado de un relieve de vertientes escarpadas. Aguas abajo de la formación del río Chocho o Panches, este drena en dirección noreste – suroeste hasta su desembocadura en el río Sumapaz, recogiendo las aguas de afluentes de menor importancia a lo largo de su recorrido, con buen desarrollo hídrico sobre las dos vertientes, teniendo como característica predominante el régimen torrencial de todas las corrientes que la conforman. (CAR, (n.a)).

Como se ha mencionado previamente, el tramo analizado del río Chocho se caracteriza por presentar una pendiente de alrededor del 5%, lo cual hace que sus aguas presenten una velocidad considerable, 0.4 m/s en promedio, esto sumado a la presencia de piedras que alteran la superficie del agua para mejorar la transferencia de oxígeno, cambios de dirección del flujo y viento en la zona, hacen que el río Chocho pueda tener una buena capacidad de autodepuración ante contaminantes de tipo orgánico.

En la imagen 1, se presenta el río Chocho a lo largo de su recorrido por las inmediaciones de los municipios de Silvania, Fusagasugá y Chinauta.



Imagen 1, Río Chocho a lo largo de su recorrido.

Fuente: Google maps

6.4 Marco metodológico

6.4.1 Actividades realizadas a lo largo del proyecto

A lo largo del presente trabajo fueron hechas tres visitas de campo, en las cuales se efectuaron aforos en 6 puntos ubicados a lo largo del trazado del río Chocho. En cada estación de aforo fueron tomadas muestras de agua que a su vez se analizaron en el laboratorio de la Universidad Libre. El tramo del río seleccionado está comprendido desde antes del ingreso del río a la zona de influencia de los vertimientos de la cabecera municipal de Fusagasugá, hasta 5.6 kilómetros aguas abajo del mismo municipio. En este trabajo se realizó la caracterización y aforo del río Chocho, en el tramo que pasa cerca del casco urbano de Silvania, Fusagasugá y Chinauta, de manera que a lo largo del recorrido el río fuese objeto de vertimientos de aguas residuales domésticas, dando lugar a poder verificar si el cuerpo de agua cuenta con suficiente capacidad de autodepuración para asimilar las aguas residuales vertidas por los municipios mencionados. La tabla 1 presenta las coordenadas de cada uno de los puntos de muestreo seleccionados para el presente trabajo.

Estación de muestreo	Municipio	Coordenadas		
		X	Y	Z
1	Silvania	966078	978648	1458
2	Fusagasugá	964086	975331	1291
3	Fusagasugá	961937	973523	1158
4	Chinauta	960641	971756	1112
5	Chinauta	959571	969767	923
6	Chinauta	957299	967450	809

Tabla 1, coordenadas planas de los diferentes puntos de muestreo seleccionados para el presente trabajo. Fuente: Los autores

La ubicación de estos puntos de muestreo, se puede observar en la Tabla 1, cabe señalar que los puntos de muestreo 2 y 4 corresponden a puntos de vertimiento de aguas residuales. En cada estación de muestreo se realizó el aforo de caudal y toma de muestra. El aforo fue realizado empleando un micromolinete de la marca Global Water para la determinación de la velocidad del agua. Las muestras fueron todas en recipientes plásticos y almacenados en neveras de icopor, manteniéndose refrigeradas con hielo seco hasta el traslado a las instalaciones de la Universidad Libre, donde fueron realizados los respectivos análisis de calidad del agua de acuerdo a los objetivos del proyecto.

Las muestras fueron analizadas empleando los procedimientos descritos en los Métodos Estándar para análisis de agua potable y residual, edición 22. La tabla 2 presenta la relación de parámetros y métodos utilizados.

Parámetro	Método	Expresado como
pH	SM 4500-H ⁺ B	Und
Oxígeno disuelto	SM 4500-O C	mg/L de O ₂
DBO	SM 5210 B	mg/L de O ₂
DQO	SM 5220 B	mg/L de O ₂
Nitrógeno total	SM 4500-Norg C	mg/L de N
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D	mg/L
Fósforo Total	SM 4500-P B	mg/L

Tabla 2. Métodos de análisis de las muestras recolectadas

Adaptado de: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd edition.

A lo largo de cada campaña de aforo y muestreo se realizó la georeferenciación de cada punto de interés a lo largo del cauce del río, definiéndose punto de interés como lugares en los cuales se apreció el ingreso de algún tributario al río Chocho

o de algún vertimiento de aguas residuales. La georeferenciación fue hecha empleando un GPS marca Garmin Etrex-20. La tabla 3 presenta la distancia existente entre los diferentes puntos de muestreo, también la distancia entre los puntos de muestreo y los diferentes afluentes encontrados a lo largo del tramo estudiado. La distancia entre estaciones de muestreo y velocidad en cada una de ellas es requerida para realizar la simulación de calidad del agua. En las simulaciones se asumió que la velocidad entre dos estaciones de muestreo es el promedio de velocidad entre una y otra estación, de esta manera y suponiendo además que las características del canal que representa el cauce del río son similares.

Estación de muestreo (Las estaciones de muestreo están distribuidas en sentido aguas arriba-abajo)	Afluente.	Distancia acumulada desde punto 1 (m)	Distancia entre puntos de muestreo
Punto 1 a Punto 2	Barro blanco	400	3400
	Quebrada Las Pitas	1700	
	Quebrada Los Guayabos	2150	
	Quebrada Jordan	3400	
Punto 2 a Punto 3	Drenaje sin nombre	3770	2630
	Quebrada El Hato	4550	
	Drenaje sin nombre	6030	
Punto 3 a Punto 4	Drenaje sin nombre	6130	2400
	Drenaje sin nombre	6930	
	Drenaje sin nombre	7080	
	Recorrido sin vertimiento	8430	
Punto 4 a Punto 5	Quebrada Bosa	9480	2300
	Drenaje sin nombre	10000	
	Recorrido sin vertimiento	10730	
Punto 5 a punto 6	No se presenta ingreso de vertimientos y tributarios	14030	3300
Distancia total del tramo analizado (m)			14030

Tabla 3. Distancia entre punto puntos de muestreo, y entre afluentes intermedios entre cada una de las estaciones de aforo.

Fuente: Los autores

Con los resultados de los análisis de las muestras de agua se realizó la simulación matemática de calidad del agua con el fin de delinear el efecto actual de los vertimientos sobre el cuerpo de agua. Igualmente, con las ecuaciones de tiempo crítico y DBO máxima permisible se determinará estos dos parámetros con el objeto de establecer la máxima carga contaminante soportada por el río en el tramo de estudio y se calculará el valor del indicador ICA para determinar la calidad del agua en cada una de las estaciones de muestreo y confrontar con lo analizado a través de la simulación.

7. Resultados y análisis

7.1 Resultados de las campañas de aforo y muestreo

Una vez realizada cada una de las campañas de aforo y muestreo, las muestras fueron preservadas y transportadas hasta los laboratorios de la Universidad Libre, para su posterior análisis. Las tablas que aparecen a continuación contienen los resultados de los análisis realizados in situ a las muestras tomadas en los distintos puntos de muestreo en cada una de las fechas en la cuales se realizó el trabajo de campo, los análisis in situ fueron realizados empleando un multiparámetros HORIBA modelo U 50.

Punto de muestreo y aforo	Caudal (m³/s)	Temperatura (°C)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	ORP (mV)	SDT (g/L)
1	3,27	14,2	6,99	7,6	0,34	110	0,28
2	4,24	14,7	6	4,9	0,3456	96	0,298
3	4,8	15,1	6,8	6,1	0,395	98	0,28
4	5,37	15,55	6,85	5,8	0,412	105	0,311
5	5,92	15,47	6,8	5,1	0,408	102	0,309
6	6,93	15,12	6,75	6,9	0,391	108	0,124

Tabla 4. Resultados de los análisis in situ realizados a las muestras tomadas el **18/04/2015**.

Punto de muestreo y aforo	Caudal (m³/s)	Temperatura (°C)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	ORP (mV)	SDT (g/L)
1	1,26	17,26	6,7	7,1	0,457	98	0,302
2	2,4	17,2	6,2	4,4	0,385	85	0,314
3	2,62	17,29	6,3	5,6	0,461	88	0,316
4	3,22	17,77	6,45	5,3	0,376	91	0,328
5	4,38	17,4	6,7	5	0,363	93	0,337
6	4,51	16,93	6,5	6,2	0,371	95	0,262

Tabla 5. Resultados de los análisis in situ realizados a las muestras tomadas el **18/07/2015**.

Punto de muestreo y aforo	Caudal (m³/s)	Temperatura (°C)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	ORP (mV)	SDT (g/L)
1	0,75	19,35	6,4	5,8	0,629	75	0,385
2	2,26	19,4	6,08	3,5	0,613	64	0,408
3	2,29	19,48	6,27	4,1	0,548	65	0,422
4	2,72	19,7	6,4	4,3	0,562	68	0,439
5	3,31	20,5	6,7	4	0,529	72	0,446
6	3,88	20,33	6,38	5,6	0,541	77	0,373

Tabla 6. Resultados de los análisis in situ realizados a las muestras tomadas el **19/12/2015**.

Como se puede apreciar, los resultados indican que el pH del río es levemente ácido, y presenta muy poca variación a lo largo del tramo estudiado, lo mismo ocurre con los sólidos disueltos totales (SDT) y la conductividad, por otra parte, con respecto al oxígeno disuelto es notable que entre el tramo 1 y dos se presenta un fuerte disminución de este parámetro, pero después de este punto a causa del aumento de caudal y la reaireación atmosférica del agua, el oxígeno disuelto aumenta y se mantiene sobre valores aceptables para la mayoría de los usos establecidos en el Decreto 3930 de 2010. Con respecto al Potencial de oxidoreducción (ORP) el río no varía significativamente y se mantiene en el rango de condiciones oxidantes, lo cual se puede atribuir a la presencia de oxígeno disuelto en el agua.

En tablas 7, 8, y 9, se presentan los resultados de los análisis realizados a las muestras de agua tomadas en las distintas campañas de aforo y muestreo, análisis realizados en los laboratorios de la universidad.

Punto de muestreo y aforo	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	N_Org (mg/L)	P (mg/L)	SST (g/L)
1	2,4	ND	0,4	0,12	0,0216
2	3,8	10,1	0,684	0,228	0,0221
3	4,2	11,3	0,756	0,21	0,0638
4	6,5	13,7	1,17	0,39	0,0322
5	7,4	15,5	1,332	0,59	0,0424
6	2,3	ND	0,42	0,16	0,0516

Tabla 7. Resultados de los análisis ex situ, realizados a las muestras tomadas el 18/04/2015.

Punto de muestreo y aforo	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	N_Org (mg/L)	P (mg/L)	SST (g/L)
1	4,5	12	0,81	0,226	0,0208
2	6,4	13,4	1,152	0,384	0,0212
3	7,4	15,6	1,332	0,444	0,0459
4	9,2	19,3	1,656	0,552	0,028
5	9,9	20,7	1,782	0,6	0,0302
6	3,8	ND	0,684	0,228	0,0337

Tabla 8. Resultados de los análisis ex situ, realizados a las muestras tomadas el 18/07/2015.

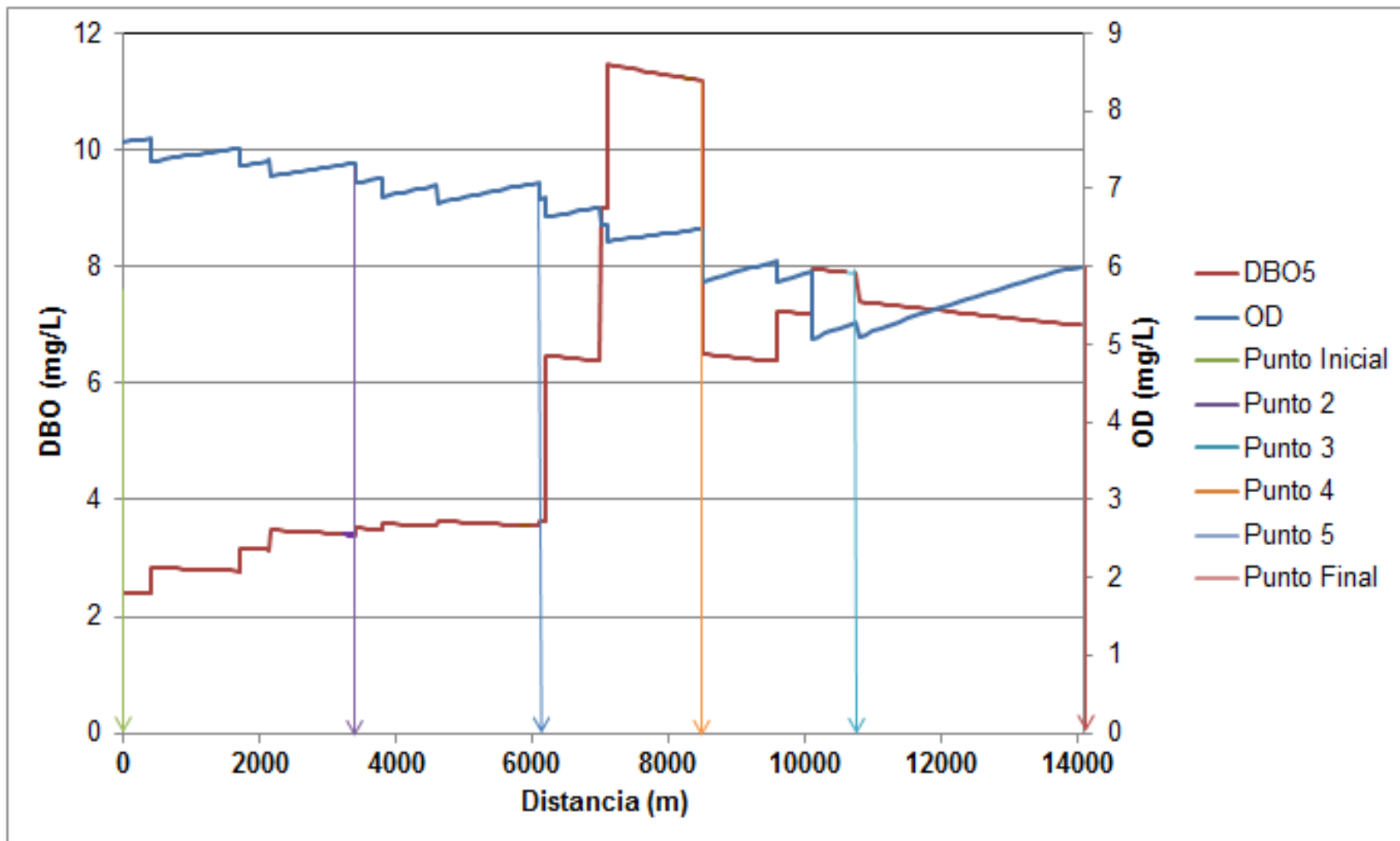
Punto de muestreo y aforo	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	N_Org (mg/L)	P (mg/L)	SST (g/L)
1	3,9	10,3	0,702	0,234	0,0196
2	7,2	14,1	1,296	0,432	0,0204
3	8,7	18,2	1,566	0,609	0,0288
4	9,7	20,4	1,746	0,679	0,0254
5	10,2	21,4	1,836	0,7	0,0271
6	5,5	12,7	0,99	0,33	0,0283

Tabla 9. Resultados de los análisis ex situ, realizados a las muestras tomadas el 18/07/2015.

7.1 Resultados de las simulaciones

De acuerdo a la información obtenida en cada una de las campañas de aforo y muestreo, se realiza la simulación de la calidad del agua del río Chocho. Para los fines del presente trabajo y de acuerdo a las características del cuerpo de agua de interés, es aceptable suponer que el agua del río se encuentra completamente mezclada a lo largo, ancho y profundo, lo cual se soporta con las características topográficas del tramo del río estudiado, conforme a las cuales la pendiente promedio del río en el tramo analizado es de aproximadamente el 5%, además de esto, la abundante presencia de rocas en el lecho del río, estimulan la turbulencia en el flujo, favoreciendo la mezcla continua del agua. Se asume también que las cinéticas de degradación y aireación obedecen a un modelo de primer orden.

Las simulaciones fueron realizadas tramo a tramo, o entre punto de muestreo y punto de muestreo, empleando el modelo simplificado a partir de la ecuación de dispersión turbulenta. Dado que entre cada estación de muestreo existían vertimientos y tributarios, la simulación fue realizada en tramos intermedios entre cada uno de los puntos de muestreo de acuerdo al número de vertimientos o tributarios encontrados en el recorrido. Las gráficas 1, 2 y 3 presentan los resultados obtenidos de la simulación de calidad de agua para el río Chocho en el tramo estudiado, en cada una de las gráficas, el eje vertical izquierdo corresponde al DBO y el eje vertical derecho corresponde a la concentración de oxígeno disuelto

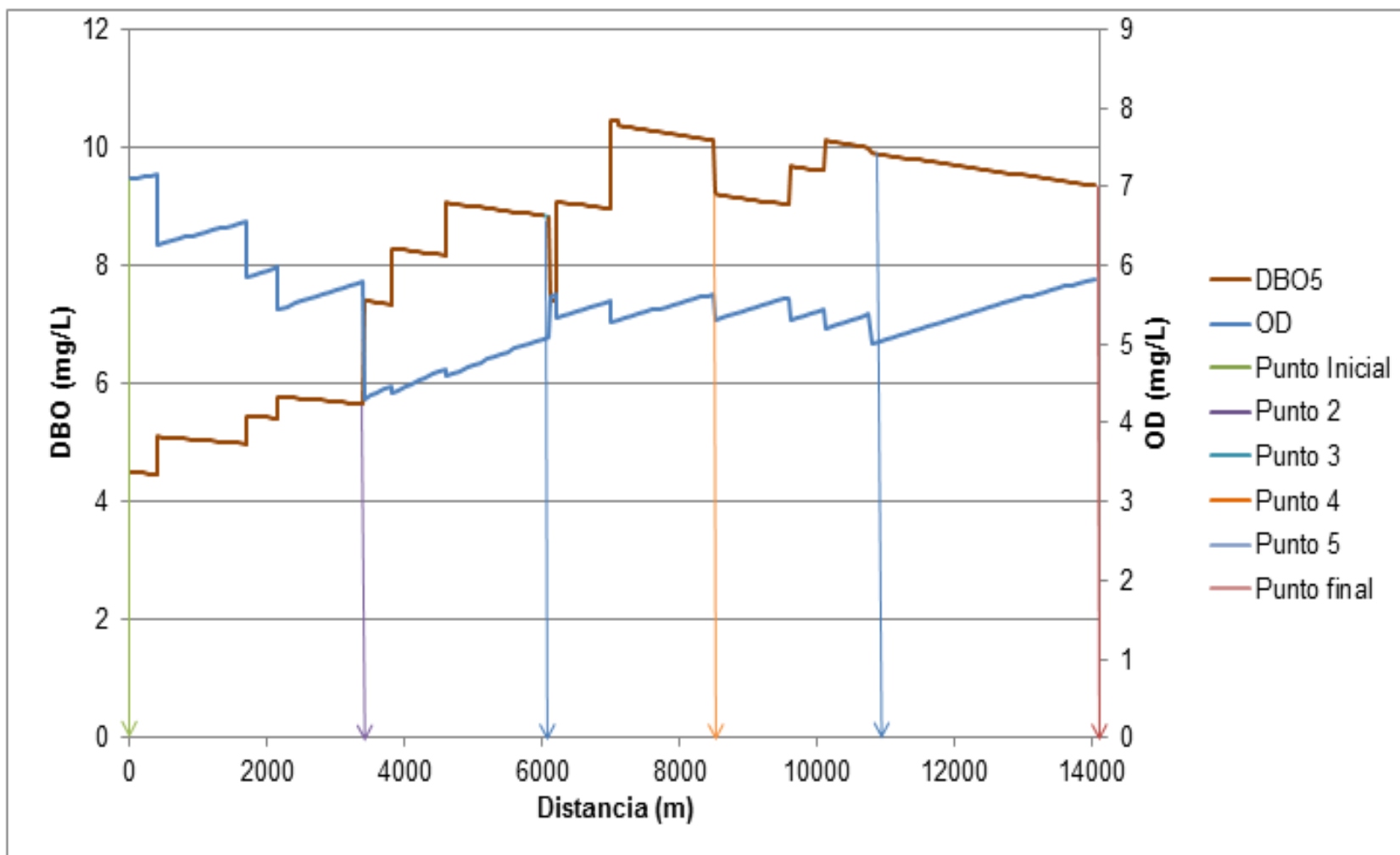


Grafica 1. Resultados de la simulación de DBO y OD Vs distancia recorrida por el agua, para la campaña de aforo y muestreo realizada el 18/04/2015.

La gráfica 1, contiene los resultados de la simulación del tramo analizado para el muestreo realizado en el mes de abril del año 2015. Se puede apreciar cómo el parámetro DBO aumenta a lo largo del tramo de estudio, mostrando una fuerte entrada de carga orgánica a los 7050 m lo cual nos da indicios de que se presenta un vertimiento, lo que se puede señalar como el punto crítico o de mayor DBO a lo largo del tramo analizado. A pesar de los ingresos de carga orgánica también se puede observar cómo el río se auto depura y mantiene su oxígeno disuelto (OD) por encima de 4 mg/L, valor considerablemente favorable desde el punto de vista de calidad ecológica del río, ya que permite la manutención de flora y fauna en el cuerpo de agua. Lo anterior se atribuye a la capacidad asimilativa que presenta el río a causa de la turbulencia de sus aguas y la pronunciada pendiente en su recorrido, lo cual favorece la reaeración atmosférica y por lo tanto la disponibilidad de oxígeno para que las bacterias puedan mineralizar los contaminantes transportados por el agua.

Cabe resaltar que, en la fecha de realización del muestreo, la zona de estudio se encontraba en temporada de lluvia, por lo tanto, el caudal del río fue mayor que en las demás campañas de aforo y muestreo y así mismo la capacidad asimilativa por dilución.

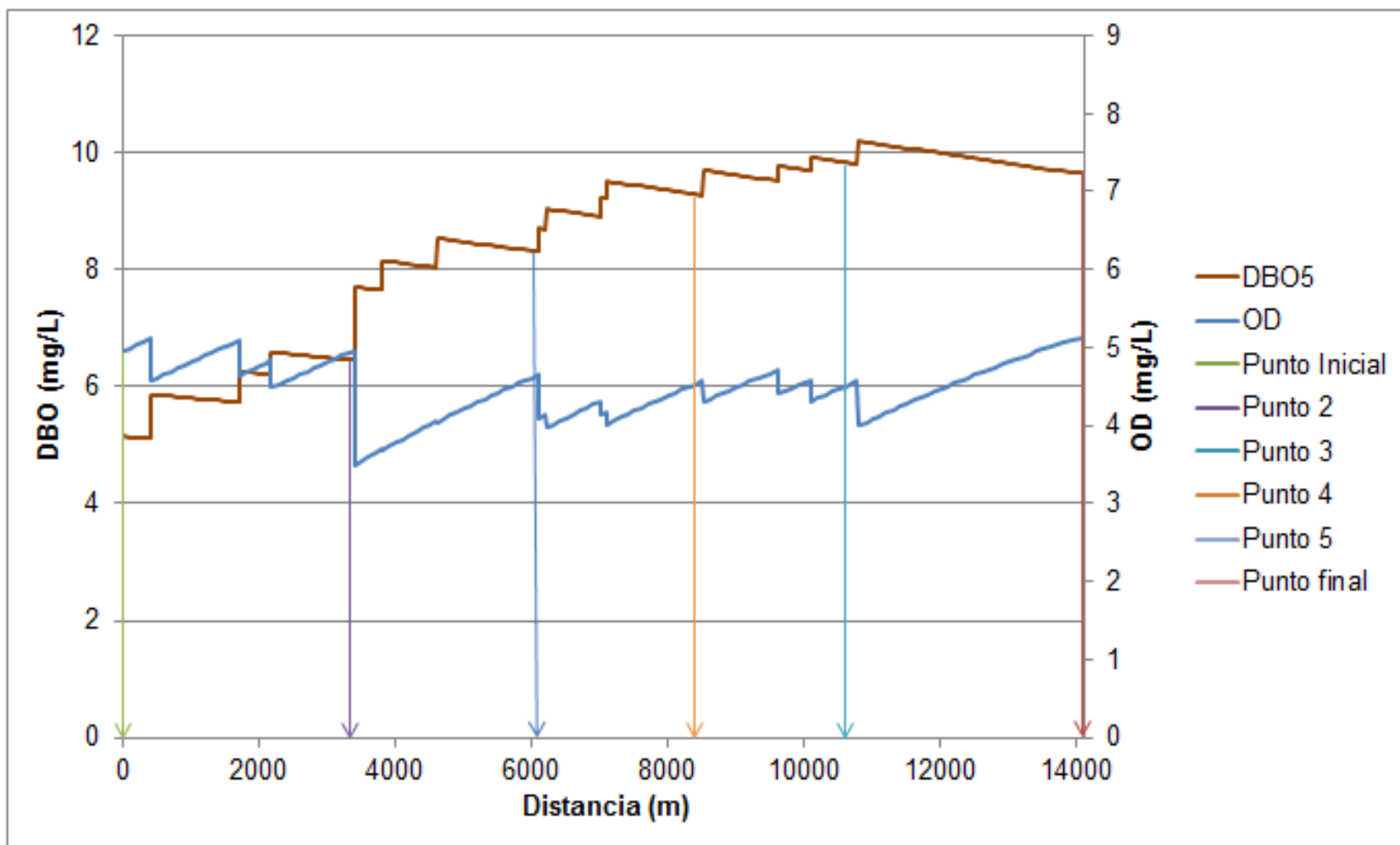
Se observa que después del punto de muestreo número 5, (ubicado a una distancia de 10730 m con respecto al punto inicial), el río Chocho no recibe corrientes tributarias y tampoco vertimientos ya que se encuentra encañonado y por este recorrido su geografía es montañosa lo cual impide viviendas o fincas, y la concentración de DBO disminuye mientras la concentración de oxígeno disuelto aumenta, lo cual denota la asimilación, o mineralización de la carga orgánica transportada por el río hasta este punto, es decir, se observa como el río se auto depura en este tramo.



Grafica 2. Resultados de la simulación de DBO y OD Vs distancia recorrida por el agua, para la campaña de aforo y muestreo realizada el 18/07/2015.

La gráfica 2, contiene los resultados de la simulación del tramo en estudio, diferenciándose porque dicha campaña de muestreo fue realizada en el mes de julio de 2015. Se pueden observar los aportes de DBO por afluentes y vertimientos (los cuales son los responsables del aumento de la carga orgánica en el transportada por el río) a lo largo del tramo de estudio afectando dicho parámetro, lo cual va disminuyendo ligeramente la calidad del recurso, pero a su vez, se puede ver que el oxígeno disuelto a pesar de su disminución por el aumento de carga orgánica tiende a recuperarse después de los 4000 m, ratificando su mejoría a partir de los 11050 m donde no se apreciaba aportes de agua residual o algún tributario que pueda afectar la calidad del agua.

De acuerdo a los resultados de la simulación, se puede concluir que el río Chocho no presenta condiciones críticas en cuanto a oxígeno disuelto a lo largo de su recorrido y por lo tanto se puede concluir que, para esta temporada, la capacidad asimilativa del río es suficiente para que los microorganismos presentes en sus aguas puedan mineralizar la carga orgánica recibida a lo largo del tramo de estudio.



Grafica 3. Resultados de la simulación de DBO y OD Vs distancia recorrida por el agua, para la campaña de aforo y muestreo realizada el 19/12/2015.

La gráfica 3, contiene los resultados de la simulación realizada con los parámetros obtenidos de la campaña de muestreo efectuada en el mes de diciembre del año 2015. Diciembre del 2015 se caracterizó por una fuerte temporada seca, y por lo tanto bajos niveles de agua en los ríos. En el gráfico anterior, se observa que los valores de oxígeno disuelto son los más bajos reportados con respecto a los resultados de los análisis hechos en las campañas de aforo y muestreo anteriores, lo cual permite concluir que en esta época de escasez de lluvia el hecho de tener caudales mucho más bajos, afecta directamente la capacidad asimilativa por dilución y así mismo, este hecho puede afectar la capacidad de autodepuración del río. Lo anterior se verifica al observar en los resultados arrojados como el parámetro DBO presenta los más altos valores registrados durante el desarrollo del proyecto a lo largo de todo el tramo de estudio. Al igual que para las anteriores campañas de aforo y muestreo, los resultados de la simulación denotan que el río presenta tendencia a mejorar en términos de concentración de oxígeno disuelto, a partir de los 11000 m de recorrido, punto a partir del cual el río no recibe tributarios y tampoco vertimientos que sean considerables para afectar la calidad del agua, por lo tanto este tramo es un tramo propicio para la recuperación de la calidad del agua.

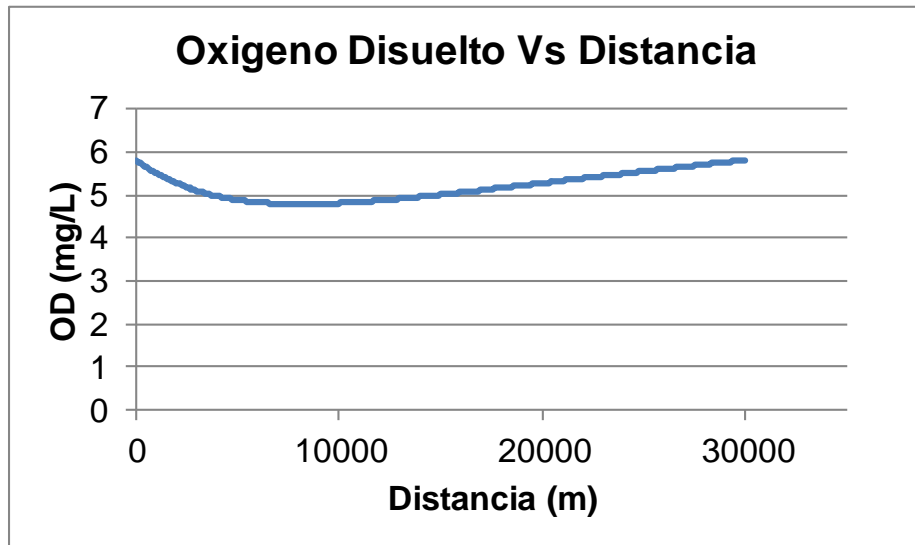
Cabe señalar que, para efectos del presente análisis, el valor de oxígeno disuelto crítico se fija de acuerdo a los parámetros de ordenación del recurso más restrictivos. En otros términos, se considera que todo valor de concentración de oxígeno disuelto por debajo de 4 mg/L, es considerado señal de deterioro de la calidad del agua y por lo tanto, detrimento de las condiciones ecológicas del cuerpo de agua superficial.

7.2 Máxima concentración de DBO en el cuerpo de agua receptor

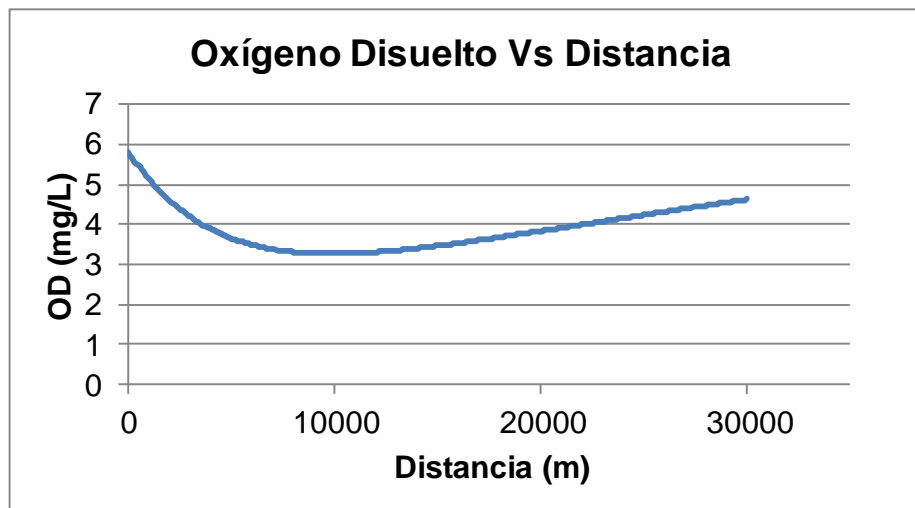
Para determinar la máxima DBO que puede soportar el río, se hace la simulación para las condiciones de mayor fragilidad en términos de asimilación de contaminantes. Para el río Chocho, esta situación corresponde al periodo de baja precipitación, periodo para el cual, la capacidad asimilativa de contaminantes por dilución es la menor.

A partir de las ecuaciones de modelación, se realiza la simulación, variando la concentración de DBO desde el primer punto de aforo y muestreo hasta que la concentración de oxígeno disuelto en algún punto del recorrido analizado, llegue a presentar un valor de 4 mg/L, se tomó este valor como parámetro crítico, conforme a los criterios de ordenación de recurso estipulados en el Decreto 1594 de 1984.

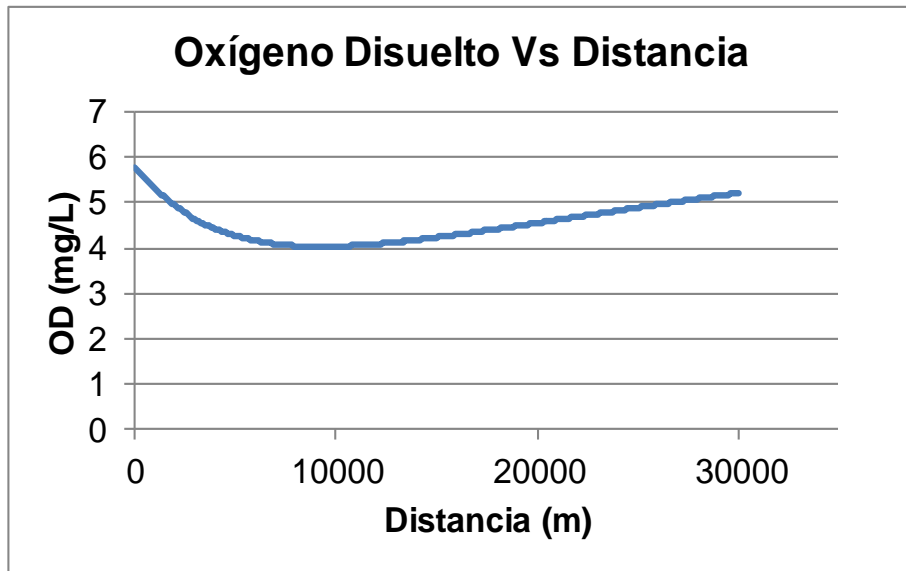
Las gráficas que aparecen a continuación, presentan el comportamiento del oxígeno disuelto en el agua para distintas concentraciones iniciales de DBO, se puede observar cómo en la medida que se incrementa la DBO inicial, el oxígeno disuelto disminuye. Los gráficos 4 a 7, presentan el comportamiento del oxígeno disuelto del agua del río Chocho a lo largo de su recorrido, conforme al proceso de tanteo realizado para determinar la máxima DBO soportada por el río, para que el oxígeno disuelto del agua del río sea siempre superior a 4 mg/L.



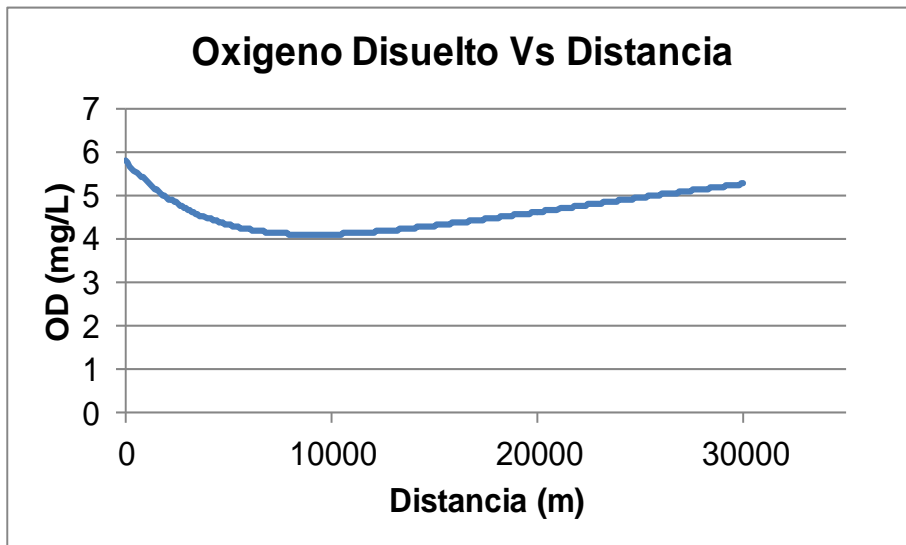
Gráfica 4. Simulación de calidad del agua del río Chocho para condiciones promedio en tiempo seco, la DBO en el punto de inicio de la simulación fue de 40 mg/L.



Gráfica 5. Simulación de calidad del agua del río Chocho para condiciones promedio en tiempo seco, la DBO en el punto de inicio de la simulación fue de 60 mg/L.



Gráfica 6. Simulación de calidad del agua del río Chocho para condiciones promedio en tiempo seco, la DBO en el punto de inicio de la simulación fue de 50 mg/L.



Gráfica 7. Simulación de calidad del agua del río Chocho para condiciones promedio en tiempo seco, la DBO en el punto de inicio de la simulación fue de 49 mg/L.

Como se observa en la gráfica 7, si la concentración de DBO en el agua del río no supera los 49 mg/L, el oxígeno disuelto del agua del río será superior a 4 mg/L a lo

largo del tramo analizado. Es necesario resaltar que las condiciones de simulación fueron las condiciones promedio del río para tiempo seco, es decir velocidad del agua, temperatura del agua y ancho del río y profundidad del río, se despreció la variación de concentración de oxígeno de saturación con respecto a la altitud.

7.3 Resultados de los análisis de nitrógeno y fósforo.

Puntos de muestreo	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)
1	0.4	0,12
2	0.684	0.228
3	0.756	0.21
4	1.17	0.39
5	1.332	0.59
6	0.42	0.16

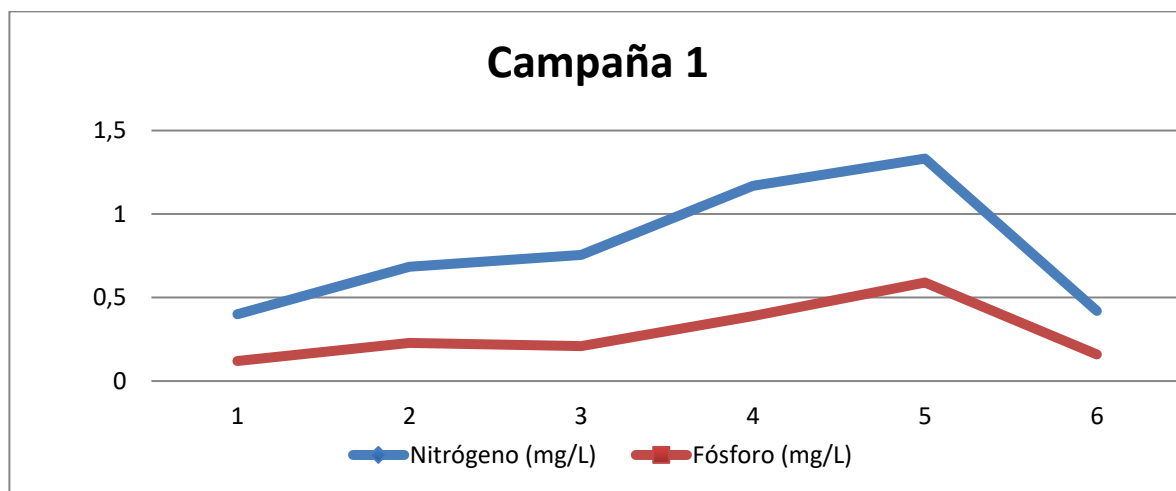


Tabla 10. Resultados obtenidos en laboratorio de la campaña de muestreo realizada el 18/04/2015

Puntos de muestreo	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)
1	0,81	0,226
2	1,152	0.384
3	1,332	0.444
4	1.656	0.552
5	1.782	0.6
6	0.684	0.228

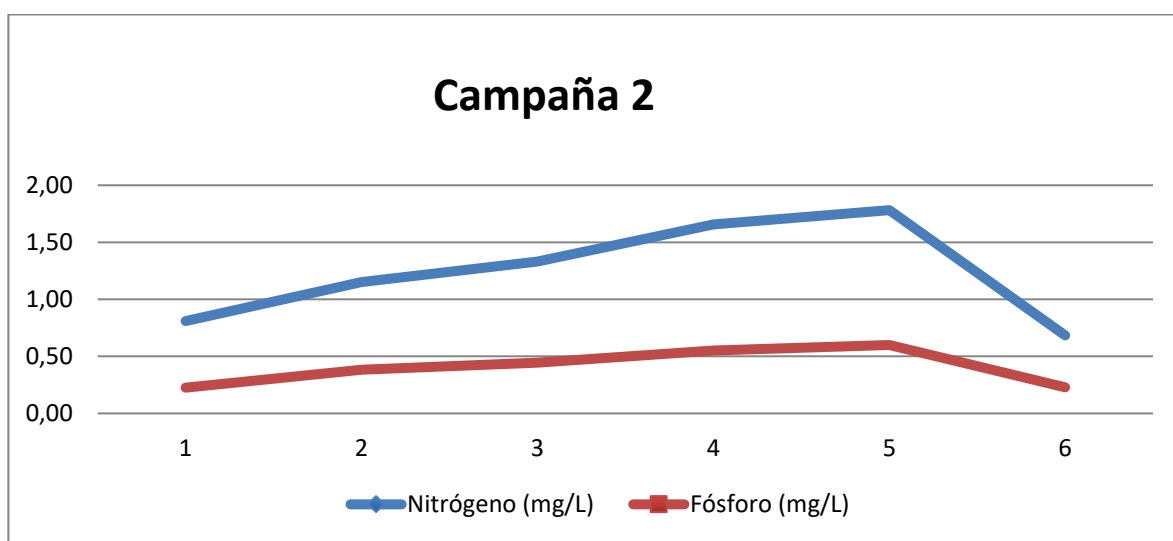


Tabla 11. Resultados Obtenidos en laboratorio de la campaña de muestreo realizada el 18/07/2015

Puntos de muestreo	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)
1	0.702	0,234
2	1,296	0.432
3	1,566	0.609
4	1.746	0.679
5	1.836	0.7
6	0.99	0.33

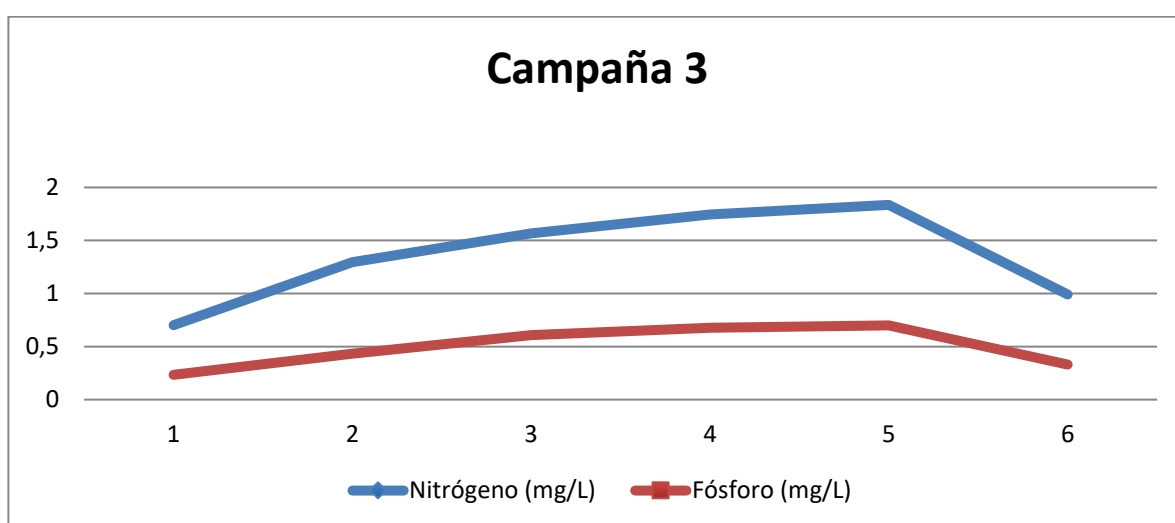


Tabla 12. Resultados obtenidos en laboratorio de la campaña de muestreo realizada el 19/12/2015

De acuerdo a los resultados presentados en las tablas anteriores, se aprecia que tanto las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el agua del río tienden a ser mayores en épocas de baja precipitación, es decir, cuando el caudal del río es más bajo. Lo anterior se explica teniendo en cuenta que, a menor caudal de agua transportada por el río, la capacidad de dilución de contaminantes disminuye.

Tanto el nitrógeno como el fósforo son importantes en la calidad del agua superficial debido a que estos dos elementos son macronutrientes, razón por la cual, cuando se encuentran en altas concentraciones en el agua, incrementan la

productividad de las plantas, dando como resultado un aumento en el crecimiento de estas y por lo tanto un cambio en la apariencia, dando como resultado la afectación de las márgenes del río, en términos de proliferación de plantas y de algas en el seno del líquido, por otra parte, en cuerpos de agua lénticos pueden dar lugar al fenómeno conocido como eutrofización, sin mencionar que el nitrógeno en su proceso de asimilación por parte de los microorganismos requiere de oxígeno para la oxidación a compuestos como nitratos y nitritos, en otras palabras, el nitrógeno en su proceso de degradación, da lugar a un incremento de la demanda de oxígeno en el agua y por lo tanto altera las características ecológicas de la fuente de agua superficial. (Cárdenas Calvachi & Ortiz Sanches, 2013)

Los datos presentados en las tablas permiten observar cómo a lo largo de los tramos 1 a 5 la concentración de estos parámetros se incrementa gradualmente a causa de los distintos aportes de agua recibidos por el río. Para el nitrógeno se puede observar que entre el punto 5 y 6 la concentración de este parámetro disminuye, a causa de la degradación del nitrógeno orgánico en medios aerobios, que da como resultado un incremento en la concentración de nitritos y nitratos en el agua.

Con respecto al fósforo, se puede observar que entre el punto 5 y 6 se presenta una muy pequeña variación. Las formas químicas en las cuales cotidianamente se puede encontrar el fósforo en el agua son formas completamente oxidadas que no cambian o se degradan en ambientes aerobios, los cuales son ambientes oxidantes. La disminución puede ser a causa de la precipitación de los iones de fósforo al reaccionar con especies alcalinas que pueden dar como resultado una sal insoluble que se precipita en los pocos tramos lénticos que se encuentran en transcurso del recorrido del río entre los puntos de muestreo 5 y 6. Adicionalmente

esta disminución en la concentración de fósforo se puede deber al consumo de este nutriente por parte de plantas y microorganismos.

7.4 Indicadores de calidad del agua

Los Indicadores de Calidad del Agua (ICAs) se definen como, un número comprendido en el intervalo entre 0 y 1, y el cual señala el grado de calidad de un cuerpo de agua, en términos del bienestar humano independiente de su uso. Este indicador es una combinación de las condiciones físicas, químicas y en algunos casos microbiológicos del cuerpo de agua, y permite analizar posibles problemas de contaminación en la corriente de agua. El indicador fue construido, tomando en cuenta una gama de factores ambientales a través de variables simples que permiten el análisis de los principales orígenes de la contaminación, entre dichas variables se cuentan el oxígeno disuelto, materia orgánica (en términos de DBO y DQO), sólidos, mineralización, acidez, entre otros.

Sin embargo, el alcance de este indicador no es capaz de integrar la complejidad de los fenómenos naturales y la variabilidad climática de forma minuciosa y diferencial, impidiendo identificar de forma específica si el origen de los aportes a la muestra es natural o antrópico, aunque algunas veces puede inferirse intuitivamente el origen principal de dichos aportes. (IDEAM, 2014).

CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SEGÚN LOS VALORES QUE TOME EL ICA		
Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 - 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 - 0,50	Mala	Naranja
0,51 - 0,70	Regular	Amarillo
0,71 - 0,90	Aceptable	Verde
0,91 - 1,00	Buena	Azul

Tabla 10. Código de colores para identificar validez del agua de acuerdo al ICA.

Fuente: (IDEAM, 2011)

A continuación, en las tablas 11, 12 y 13, se presentan los resultados del cálculo del indicador ICA para el río Chocho en cada una de las distintas estaciones de muestreo y para cada una de las fechas en que fue realizado el muestreo.

	Muestreo realizado el 18 de abril de 2015					
	M1_P1	M1_P2	M1_P3	M1_P4	M1_P5	M1_P6
lod	0.7122	0.464	0.5826	0.5593	0.4908	0.6596
ldqo	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
lsst	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
lc.e	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
lpH	1	0.6	0.9	0.93	0.9	0.88
int/pt	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ICA	0.784474	0.68228	0.747442	0.747981	0.731836	0.757532

Tabla 11. ICA para cada estación de muestreo.

Como se aprecia en la tabla el indicador ICA para el río Chocho señala que sus aguas son de calidad aceptable, excepto en la estación de muestreo 2, lo cual es coherente con el hecho que justo antes del punto de muestreo número 2, el río recibe un aporte significativo de aguas residuales, el cual se ve diluido por el caudal del río, no sin afectar el valor del índice de calidad para clasificar el agua como de regular calidad. No es extraño que la calidad del agua sea aceptable, dado que durante la temporada en la cual fue realizado el muestreo a causa de las fuertes lluvias el caudal del río se incrementa, con lo cual se favorece la capacidad asimilativa de contaminantes por dilución.

	Muestreo realizado el 18 de julio de 2015					
	M2_P1	M2_P2	M2_P3	M2_P4	M2_P5	M2_P6
lod	0.7114	0.4305	0.5611	0.5135	0.4734	0.6019
ldqo	0.91	0.91	0.91	0.91	0.71	0.91
lsst	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
lc.e	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
lpH	0.86	0.66	0.7	0.75	0.86	0.77
int/pt	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ICA	0.763338	0.685585	0.713787	0.713195	0.688878	0.731223

Tabla 12. ICA para cada estación de muestreo.

De la tabla anterior se puede concluir que de acuerdo al ICA el río Chocho presenta calidad del agua regular en las estaciones de muestreo 2 y 3, por lo tanto, los tramos comprendidos entre las estaciones 2 y 3 y las estaciones 5 y 6 el agua el río se considera de regular calidad, y por ende se puede afectar la aptitud de uso del recurso.

	Muestreo realizado el 19 de diciembre de 2015					
	M3_P1	M3_P2	M3_P3	M3_P4	M3_P5	M3_P6
lod	0.6098	0.3657	0.4222	0.4451	0.4123	0.5749
ldqo	0.91	0.91	0.91	0.71	0.71	0.91
lsst	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
lc.e	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
lpH	0.73	0.62	0.69	0.73	0.86	0.73
Int/PT	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ICA	0.726566	0.668569	0.688674	0.664567	0.678491	0.720633

Tabla 13. ICA para cada estación de muestreo.

Los resultados de la tabla anterior, demuestran que, para la temporada de baja precipitación, la calidad del agua del río Chocho se ve afectada significativamente, pasando de ser de calidad aceptable en la mayor parte del tramo estudiado a ser de calidad regular para el tramo comprendido entre los puntos 2 y 5. Este hecho puede ser a causa de la disminución del caudal del río, lo cual afecta la capacidad de dilución de contaminantes de esta corriente superficial.

Los índices de calidad del agua (ICA) presentados en el año 2016, por la Corporación Autónoma Regional (CAR) en el Boletín de calidad hídrica, confirman lo analizado en las tablas 11, 12 y 13 del presente estudio. Se puede observar que en el documento oficial de la CAR el ICA del Río Panches es de 0,6389, valor cercano a los arrojados por el Río Chocho.

8. Conclusiones

Conforme a los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo se puede concluir lo siguiente.

Si bien es claro que la capacidad asimilativa del río en términos de materia orgánica es muy buena, también se debe aclarar que la concentración máxima de DBO que soporta este cuerpo de agua es de 49 mg/L, si el ingreso de carga es mayor el oxígeno disuelto será menor a los 4 mg/L generando así un deterioro del recurso.

Debido a la pendiente del río a lo largo del tramo analizado, la velocidad del agua provoca suficiente turbulencia para validar la suposición de mezcla completa empleada en las simulaciones a partir del modelo de Streeter & Phelps.

La capacidad asimilativa del río Chocho, así como la de todas las corrientes de aguas superficial, presenta una fuerte dependencia de su capacidad de dilución de contaminantes, lo cual debe ser analizado con cuidado, teniendo en cuenta que los municipios que vierten aguas a este río, son municipios con una considerable aptitud turística como lo son Fusagasugá y Silvania, hecho que lleva a que se presenten picos o aumentos significativos de la carga orgánica vertida al río y por lo tanto al deterioro gradual de la calidad ecológica como se evidenció en el punto de muestreo número dos.

Las características del río Chocho (pendiente del cauce, velocidad del agua, caudal) hacen que esta corriente superficial presente una muy buena capacidad asimilativa de materia orgánica, en otras palabras, la capacidad de reaeración del río Chocho es suficiente para soportar los requerimientos de oxígeno de las

bacterias que se encargan de realizar la mineralización de la materia orgánica que el río recibe a lo largo de su recorrido.

El cálculo del indicador (ICA), señala claramente que la calidad del agua del río es aceptable en temporada de lluvias durante el 70 % del tramo analizado, por otra parte, en temporada seca, es decir de muy baja precipitación, la calidad del agua del río en términos del ICA pasa de ser aceptable a regular. Por efecto de la disminución de caudal del río.

De acuerdo a los resultados de la simulaciones, la calidad del agua del río Chocho es aceptable para la mayoría de los usos propuestos en el Decreto 3930 de 2010, presentándose alteraciones entre los puntos 2 a 5, entre los cuales el agua no es apta para uso recreativo por contacto primario y secundario, situación que se debe a los vertimientos recibidos por el río, también se puede observar que entre el punto 5 y 6 la calidad del agua presenta mejoría, recuperando la aptitud de uso recreativo, lo cual señala una marcada capacidad de auto recuperación del río en términos de asimilación de materia orgánica.

Los anexos presentan datos de características hidráulicas del río Chocho en las distintas estaciones de muestreo y la posible ordenación de usos del recurso hídrico conforme a lo estipulado en el Decreto 1594 de 1984.

9. Recomendaciones

Se debe realizar la determinación del caudal mínimo transportado por el río Chocho y el tiempo de recurrencia de dicho caudal, esto con el objeto de realizar la proyección o diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para los municipios que vierten sus aguas en esta corriente superficial. Como bien se observa en los resultados del trabajo, la calidad del agua del río depende significativamente de la capacidad de dilución de contaminantes, la cual, depende del caudal transportado.

Vale la pena realizar el cálculo del $7Q_{10}$ (caudal mínimo transportado por el río durante 7 días y con un tiempo de recurrencia de 10 años) con el fin de realizar la simulación de calidad del agua del río para dichas condiciones y así comparar con las condiciones de mínimo caudal histórico en el río.

10. Bibliografía

- Holvoeta, K., Seuntjens, P., & Vanrolleghem, P. (2007). Monitoring and modeling pesticide fate in surface waters at. *Ecological Modelling*, 209, 53-64.
- Ministerio de Agricultura. (26 de Junio de 1984). *Decreto 1594, Artículo 11*. Retrieved 05 de Junio de 2014 from Alcaldia de Bogota:
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>
- Londoño Pérez, R. D., & Parra Martínez, Y. (2007). Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general. *Épsilon* (9).
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (25 de Octubre de 2010). *Decreto 3930, Artículo 67*. Retrieved 2014 de Junio de 05 from
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>
- Thomann, R., & Mueller, J. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. New York:Harper & Row.
- Pelletier, G., Chapra, S., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw e A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software* 21, 1-7.
- IDEAM. (2014). <http://www.ideam.gov.co/>. From Los indicadores de calidad del agua ica:
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>
- CAR. ((n.d)). *Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la cuenca hidrográfica del río Sumapaz. Capítulo 5, Página 12, 18 y 27. Capítulo 7, Página 17.*
- CAR. ((n.a)). *Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la cuenca hidrográfica del río Sumapaz. Capítulo 1, Página 1. Capítulo 2, Página 9 y 26.*
- EMSERFUSA E.S.P. *Plan local de emergencias y contingencias PLEC. Página 69.* Fusagasugá.
- Rosalba Casanova, A. G. (2007). <http://www.revistas.unal.edu.co>. From
<http://www.revistas.unal.edu.co>:
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1709/11601>
- Conesa Fernández, V. (2009). *Guia metodologica para la evualuacion del impacto ambiental*. Madrid España: Grupo Mundi - Prensa.

Domínguez, J. B. (2005). Empleo del Modelo de Streeter y Phelps Modificado para la Planificación de Estrategias de Saneamiento del Río Almendares. *Revista CENIC Ciencias Químicas* , VOL 36.

Vera, L. (2009). *Modelacion de la Capacidad Máxima de Asimilación de Vertimientos de Carga Orgánica en la Ciénaga de Mesolandia en e IDepartamento del Atlántico. Capítulo 1, página 16 y 17.*

Leoz, T. B.-A.-V. (2011). *Metodología para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico*. From <https://revistas.udem.edu.co>:
<https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/442>

Cea, L. y. (s.f). <http://www.iberaula.es>. From Modelación matemática del flujo de agua de un río:
http://www.iberaula.es/public/files/file_1_6_Modelizacin%20matemtica%20en%20lecho%20fijo%20de%20fl.pdf

Díaz, E. (2004). *Modelación de la Calidad del Agua en el Interceptor Río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas. Capítulo 1, página 2.*

Valcárcel, L. B. (2010). *Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. NUCLEUS. 47: 16-23.*

Cárdenas Calvachi, G. L., & Ortiz Sanches, I. A. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente. *Revista Universitaria y Salud* , 15 (1), 72.

IDEAM. (Octubre de 2011). *Evaluación de la calidad de agua ICA - IDEAM. Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad*. From <http://www.ideam.gov.co>:
http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_Fl.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031

Anexo 1

Parámetros de caracterización hidráulica del río Chocho

A continuación, se presentan los parámetros para la caracterización hidráulica del río Chocho, parámetros calculados a partir de los datos recolectados en las campañas de aforo y muestreo.

Tabla A1. Parámetros hidráulicos del río Chocho.

Punto de muestreo	$U = a * Q^b$	$H = \alpha * Q^\beta$	Coefficiente de correlación
1	$U = 0,139 * Q^{0,525}$	$H = 0,579 * Q^{0,416}$	0.96371997
2	$U = 0,219 * Q^{0,406}$	$H = 0,250 * Q^{0,527}$	0.96832762
3	$U = 0,378 * Q^{-0,150}$	$H = 0,192 * Q^{0,931}$	0.98646542
4	$U = 0,145 * Q^{0,567}$	$H = 0,517 * Q^{0,157}$	0.95817542
5	$U = 0,136 * Q^{0,411}$	$H = 0,610 * Q^{0,200}$	0.93896506
6	$U = 1,359 * Q^{-0,528}$	$H = 0,155 * Q^{0,762}$	0.94626305

Ordenación del recurso

Las tablas que aparecen a continuación, contienen los datos para realizar la ordenación del recurso conforme a los resultados de los análisis de calidad del agua realizados como parte de este proyecto. Los criterios de calidad del agua para plantear la presente ordenación del recurso, fueron tomados del Decreto

1594 de 1984. El color verde indica que el agua en el punto presenta condiciones adecuadas para ser destinada a este uso, el color rojo, indica que el agua no cumple con los criterios para la destinación del recurso en el punto.

Tabla A2. Ordenación del recurso para la primera campaña de aforo y muestreo

18 de Abril de 2015						
Uso	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Calidad admisible para la destinación del recurso humano y doméstico, indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, indican que para su potabilización se requiere solo desinfección.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso agrícola.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso pecuario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto primario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto secundario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna, en aguas dulces, frías o cálidas y en aguas marinas o estuarias.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso industrial NO APLICA						

Tabla A3. Ordenación del recurso para la segunda campaña de aforo y muestreo

18 de Julio de 2015						
Uso	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Calidad admisible para la destinación del recurso humano y doméstico, indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, indican que para su potabilización se requiere solo desinfección.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso agrícola.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso pecuario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto primario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto secundario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna, en aguas dulces, frías o cálidas y en aguas marinas o estuarias.						
Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso industrial NO APLICA						

Tabla A4. Ordenación del recurso para la tercera campaña de aforo y muestreo

19 de Diciembre de 2015						
Uso	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Calidad admisible para la destinación del recurso humano y doméstico, indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, indican que para su potabilización se requiere solo desinfección.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso agrícola.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso pecuario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto primario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto secundario.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna, en aguas dulces, frías o cálidas y en aguas marinas o estuarias.						
Calidad admisible para la destinación del recurso para uso industrial NO APLICA .						

Anexo 2

Estudio y análisis de la calidad del agua (Río Panches)

A continuación se presentan los resultados obtenidos por la CAR en un estudio realizado en el Río Panches en el año 2017, río en el cual convergen las aguas del Río Chocho. Se presentan pantallazos puntuales de los parámetros relevantes para el estudio (DBO - OD).

RESULTADOS ANALISIS AGUA										
N°	PARÁMETRO	UNIDADES	Método Analítico	Fecha Análisis	LCT / LCM		LÍMITE NORMATIVIDAD	MUESTRAS N°.		
								1322-17		1323-17
1	Aceites y Grasas	mg AyG / L	Extracción Soxhlet (SM 5520 D)	2017-05-03	LCT	10,0	0,0	<LCT	<LCT	<LCT
2	Acidez	mg CaCO3 / L	Titulación Potenciométrica (SM 2310 B)	2017-04-21	LCM	6,0		5,1 +/- 0,2	<LCM	3,9 +/- 0,1
3	Alcalinidad Total	mg CaCO3 / L	Titulación potenciométrica (SM 2320 B)	2017-04-21	LCM	6,0		8,4 +/- 0,3	31,0 +/- 1,2	11,0 +/- 0,4
5	Cianuros Kit campo	mg CN / L	Kit de campo - Colorimétrico Ácido Barbúrico - Pictina/Microquant - 1.14796.001	2017-04-20	LCT	0,030	0,2	<LCT	<LCT	<LCT
8	Cloro Libre Residual(Kit Campo)	mg Cl como Cl2 / L	Colorimétrico DPD/Microquant 1.14978.0001	2017-04-20	LCT	0,10		<LCT	<LCT	<LCT
10	Cloruros*	mg Cl- / L	Argentométrica Titulación Potenciométrica (SM 4500 Cl- D)	2017-04-21	LCM	3,0	250	<LCM	5,14 +/- 0,10	<LCM
11	Color	Unidades CoPt	Comparación visual (SM 2120 B)	2017-04-21	LCM	3,0	75	80 +/- 0,8	90 +/- 0,9	80 +/- 0,8
13	Conductividad de campo*	µS / cm	Electrométrico, SM 2510 B	2017-04-20	LCM			33,2 +/- 0,1	108 +/- 0,3	44,5 +/- 0,1
16	DBO *	mg O2 / L	Incubación a 5 días y Electrodo de Membrana, SM 5210 B, 4500-O G	2017-04-20	LCM	2,0		<LCM	<LCM	<LCM
18	DQO *	mg O2 / L	Reflujo Abierto (SM 5220 B) Modificado- menor cantidad Reactivos	2017-04-24	LCM	10,0		41,8 +/- 2,9	38,1 +/- 2,6	47,5 +/- 3,3
25	Fenoles	mg Fenol /L	Colorimétrico directo (SM 5530 D) 4-aminopiridina	2017-04-25	LCT	0,10	0,002	<LCT	<LCT	<LCT
26	Fósforo Orto*	mg-Pi / L	Ácido Ascórbico (SM 4500-P E)	2017-04-21	LCM	0,010		0,036 +/- 0,003	0,127 +/- 0,011	0,051 +/- 0,004
27	Fósforo Total*	mg-Pi / L	Digestión Ácida - Ácido Ascórbico, SM 4500-P B, E	2017-04-26	LCM	0,060		0,115 +/- 0,009	0,101 +/- 0,008	0,132 +/- 0,011
28	N- Amomiacal	mg N-NH3 / L	colorimétrico-Nessler (SM 417 B - Ed. 16)	2017-04-21	LCM	0,70	1,0	<LCM	0,888 +/- 0,36	NR
29	N- Total Kjeldahl*	mg N-NH3 / L	Macro-Kjeldahl, Destilación y Volumétrica, SM 4500-NH3 B y SM 4500-NH3 B, C	2017-04-25	LCM	1,0		<LCM	1,6 +/- 0,2	<LCM
35	N- Nitrato	mg N-NO3 / L	Colorimétrico Ácido Cromotrópico (SM 418 D - Ed 16)	2017-04-21	LCT	0,10	10	1,160 +/- 0,00	2,466 +/- 0,00	4,988 +/- 0,00
36	N- Nitrito*	mg N-NO2 / L	Colorimétrico-NEO(SM 4500-NO2 B)	2017-04-21	LCM	0,004	1,0	<LCM	0,051 +/- 0,1600	0,019 +/- 0,3731
38	Oxígeno Disuelto en campo*	mg O2 / L	Electrodo de membrana (4500-O G)	2017-04-20	LCM			7,1 +/- 0,03	6,7 +/- 0,03	7,1 +/- 0,03

Adaptado del documento No. 20172149261 original de la CAR.

Se puede observar que la cantidad de DBO presente está en el límite de cuantificación del método (2 mg/L), lo que indica que su nivel es muy bajo. Así mismo el oxígeno disuelto arroja un promedio con las tres mediciones de 6,96 mg/L, valor favorable para la calidad del recurso. Con este estudio realizado por la Corporación Autónoma Regional (CAR) en el Río Panches, podemos corroborar lo arrojado por la simulación matemática y por las tomas de muestra in situ realizadas en el Río Chocho en el presente estudio, ya que como se indicó a lo largo del mismo la calidad del agua en términos de DBO y de oxígeno disuelto aguas abajo continua mejorando, gracias a la capacidad de auto – depuración del río. (El documento original enviado por la CAR se añade al estudio como anexo)